第 38 卷第 5 期 2018 年 3 月
生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.38,No.5 Mar.,2018

DOI: 10.5846/stxb201702190268
李梦寻,王冬梅,任远,汪西林.不同干湿交替频率对土壤速效养分、水溶性有机碳的影响.生态学报,2018,38(5):1542-1549.
Li M X, Wang D M, Ren Y, Wang X L.Influence of different drying-rewetting frequencies on available soil nutrients and DOC.Acta Ecologica Sinica, 2018,38(5):1542-1549.

不同干湿交替频率对土壤速效养分、水溶性有机碳的影响

李梦寻,王冬梅*,任　远,汪西林
北京林业大学水土保持学院水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室,北京　100083

摘要:为了探究不同干湿交替频率对速效养分、DOC 的影响机理,选择北京褐土(表层 0—10cm 土壤)为研究对象,采用室内模拟控制实验法,控制其他变量,设计一系列不同频率的干湿交替实验,在 58d 内设置了 10d 土壤培育期和 48d 试验期,其中 48d 试验期设置 0、1、2、3、4 次干湿交替,试验结束(第 58 天)进行速效养分、水溶性有机碳(DOC,Dissolved organic carbon)等主要土壤速效养分指标测定。采用单因素方差分析与 LSD 多重比较法进行数据分析,研究结果显示:恒湿组的速效钾、硝态氮含量比干湿交替组高;低频率的干湿交替使得土壤速效钾含量减少,高频率可能在后期出现释钾现象,速效钾含量随着干湿交替频率增加可能会有所增加,趋近恒湿组速效钾水平,4 次干湿交替频率是出现速效钾回升的临界次数;硝态氮含量随着频率增加也有增加趋势,低频率的 1 次干湿交替(DW1,1 drying-rewetting cycle)硝态氮含量最低,高频率的 4 次干湿交替(DW4,4 drying-rewetting cycles)最高,干湿交替频率增加更频繁的打破平衡,促进矿化,干湿交替组也趋近恒湿组的硝态氮水平。经过干湿交替,土壤中速效钾、铵态氮、DOC 的含量下降,硝态氮含量增加,速效磷、pH 的变化不明显。在固定时间内(48d),随着干湿交替的频率增加(从 1 次到 2、3、4 次),周期变短(从 48d 到 24、16、12d),干燥与湿润的持续时间变短(从 24d 到 12、8、6d),干湿交替组的速效钾、硝态氮含量分别趋于恒湿组的速效钾、硝态氮水平。

关键词:干湿交替;频率;速效养分;水溶性有机碳(DOC)

Influence of different drying-rewetting frequencies on available soil nutrients and DOC

LI Mengxun, WANG Dongmei*, REN Yuan, WANG Xilin
School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Key Laboratory of Soil & Water Conservation & Desertification Combating of Ministry of Education, Beijing 100083, *China*

Abstract: To investigate the mechanism of influence of different drying-rewetting frequencies on available soil nutrients and DOC,in this study, we collected cinnamon soil at a depth of 0—10cm below the surface in Beijing and manipulated soil water stress in the laboratory by exposing soil to 0, 1, 2, 3, or 4 drying-rewetting cycles for 58 days, including a 10 day pre-incubation period and a 48 day treatment period. After 58 days, principal soil fertility indexes such as available nutrients and DOC were tested to observe changes as a result of different drying-rewetting frequencies. Data were analyzed using single-factor variance analysis and the Least Significant Difference method (LSD) for the dependent groups. Available K and nitrate nitrogen were lower in the drying and rewetting treatments than in the constantly moist treatment(CM). Low drying-rewetting frequency might lead to the loss of available K, while K release might appear in the late stages of high drying-rewetting frequency conditions. As drying-rewetting frequency increased, the available K also increased. Four drying-

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划课题(2012BAC16B03,2011BAC09B08-07)
收稿日期:2017-02-19;　　**网络出版日期**:2017-11-21
*通讯作者 Corresponding author.E-mail: dmwang@126.com

rewetting cycles were critical for K release. Increasing the drying-rewetting frequency would result in frequent perturbations to the balance between various forms of nitrogen, and the mineralization rate would increase at the lowest drying-wetting frequency (DW1, 1 drying-rewetting cycle) and the highest drying-wetting frequency (DW4, 4 drying-rewetting cycles). As drying-wetting frequency increased, nitrate nitrogen of drying-rewetting treatment become closer to that of constantly moist (CM). Soil nitrate nitrogen significantly increased, while available K, ammonium nitrogen, and DOC significantly decreased, with drying-wetting frequency, and available P and pH were relatively insensitive to drying-rewetting frequency. In 48 days, with increase in drying-rewetting frequency (from 1 cycle to 2, 3, and 4 cycles) and decrease in drying-rewetting period (from 48d to 24, 16, and 12d) and the last period of each drying or wetting period (from 24d to 12, 8, and 6d), nitrate nitrogen and available K tended to increase to levels close to those of the constantly moist condition.

Key Words: drying-rewetting; frequency; available nutrient; Dissolved oragnic carbon(DOC)

土壤经历干旱和湿润这种交替出现的循环过程是干湿交替[1],降雨、蒸散、排水等过程均会引起土壤水分变化[2-3],土壤常常经历干湿交替。干湿交替会影响钾、氮、磷的转化和运移[4-6],还会让土壤发生"Birch 效应"[7],影响微生物活动和土壤微生物呼吸。速效养分、土壤水溶性有机碳与植物、微生物生长活动息息相关,参与生物地球化学循环[4-6,8]。土壤表层土的速效养分最直接地影响到植物生长,钾、氮、磷在供给植物生长过程中,参与钾循环、氮循环、磷循环。土壤水溶性有机碳(DOC,Dissolved organic carbon)是土壤中易被微生物氧化的碳源[9]和微生物的重要能量来源[8],参与碳循环并且是土壤碳库比较活跃的成分。DOC 可作为衡量微生物活动 CO_2释放量的重要指标[10]和土壤有机碳矿化作用的指示指标[11]。

根据全球气候系统的预估,未来各地区降水的变化趋势不一致,全球很多区域强降水、干旱等极端气候事件增多,在大部分中纬度陆地地区和湿润的热带地区,极端降水事件很可能强度更大,频率更高[2,12]。这意味着温带地区未来会经历周期更短、更加剧烈的干湿交替(多次降雨或单次长时间的连续降雨引起的干湿交替)。

国内外很多学者研究表明干湿交替过程对不同速效养分、DOC 有重要影响,频繁的干湿交替影响氮素在土壤中的累积、迁移、损失等过程,不同的研究学者对干湿交替影响下土壤氮素转化的说法却不一致:干湿交替可能会使土壤氮素矿化增加、降低或影响不显著[6]。干湿交替会降低土壤中水溶性有机碳含量[8,11,13-17],也有学者持有不同观点:干湿交替以及频繁的干湿交替会增加土壤中的水溶性有机碳[18-19],还有研究表明溶解性有机碳随干湿交替次数增加而增加[19]。因为不同研究试验中选取的土壤类型、设置的干湿交替频率、时间长短、温度、干旱湿润程度、培养环境不同,干湿交替对不同速效养分、DOC 的影响结果不同,现仍未统一。

目前国内外研究主要集中在干湿交替对碳库的影响、对困难立地土壤的影响、对生物地球化学循环的影响等方面,大多研究中干湿交替频率和干燥与湿润的持续时间依据各自地区或者土壤特性来定,程度多样,导致各干湿交替各具特色,结果不一,难以探讨干湿交替频率增加、干燥与湿润的持续时间减少,对速效养分、DOC 影响程度。本研究针对不同的干湿交替频率进行室内模拟控制实验设计,设计总长度一定、一系列频率不同的干湿交替实验,同时保持其他条件一致:同一种土壤、相同的干湿交替的干旱、湿润程度、培养温度一定等,对比分析不同干湿交替频率下速效钾、硝态氮、铵态氮、速效磷、DOC 的变化。从而研究土壤微环境在不同干湿交替频率影响下的变化状况,为更好地理解长时间的季节性变化下的营养物质保持与损失的生物地理化学相关作用,为不同降水格局下半干旱地区表层土壤微环境的改变提供变化依据,进而为半干旱地区表层土壤微环境对全球气候变化背景下降水格局改变的响应提供依据[2]。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

本研究选取北京褐土作为研究对象,取表层土(0—10cm)土于北京市西山试验林场(39°58′17.5″N 与116°11′08.9″—116°11′08.8″E 的范围,海拔 255—257m),将土样带回实验室,风干后挑出石块与可见植物残

体,过 2mm 筛,置于阴凉通风处备用。土壤理化性质详见表 1。

土壤表层取 6 个环刀,采用烘干法[20]测量土壤饱和含水量、容重、总孔隙度。

表 1 土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties

指标 Indices	值 Value	指标 Indices	值 Value
表土厚度 Depth of topsoil/m	3.00—3.50	铵态氮 Ammonium nitrogen/(mg/kg)	17.67±2.59
沙粒 Sand contents/%	34.00	速效钾 Available K/(mg/kg)	175.48±5.05
粉粒 Silt contents/%	48.00	速效磷 Available P/(mg/kg)	297.83±26.90
黏粒 Clay contents/%	18.00	水溶性有机碳 DOC/(mg/kg)	31.68±6.73
土壤容重 Soil bulk density/(g/cm^3)	1.10±0.11	水溶性 K^+ Water-soluble potassium ions/(g/kg)	0.04±0.00
土壤总孔隙度 Soil total porosity/%	57.78±2.00	水溶性 Na^+ Water-soluble sodium ions/(g/kg)	0.01±0.01
土壤 pH	7.03±0.03	水溶性 Mg^{2+} Water-soluble magnesium ions/(g/kg)	0.01±0.01
硝态氮 Nitrate nitrogen/(mg/kg)	105.43±6.70	水溶性 Ca^{2+} Water-soluble calcium ions/(g/kg)	0.37±0.05

1.2 试验方案

取风干土 50g 于 250mL 磨砂广口瓶,置于光照培养箱(25℃,光照 12h,黑夜 12h,用黑布遮住培养箱门)中进行培养。每 24h 用小风扇给广口瓶进行通气。试验进行 58d,其中前 10d 为土壤培育期,采取湿润处理。设置土壤培育期是因为微生物在物理干扰后需要经过一段时间(10d 左右)活动才能稳定下来,也为了在试验处理开始前让风干土进入湿润状态[21-22]。后 48d 为试验期,采取干燥-湿润交替处理,共设置 5 组不同频率的干湿交替试验组(在 48d 内,进行 0、1、2、3、4 次干湿交替),其中干湿交替组 4 组,恒湿组 1 组(0 次干湿交替,记为 CM,constantly moist),所有组均设置 3 个重复。具体干湿交替时间安排表见图 1。试验结束后(第 59 天)风干后取土进行各项指标测定(图 1),与试验前的土壤理化性质进行比较分析。

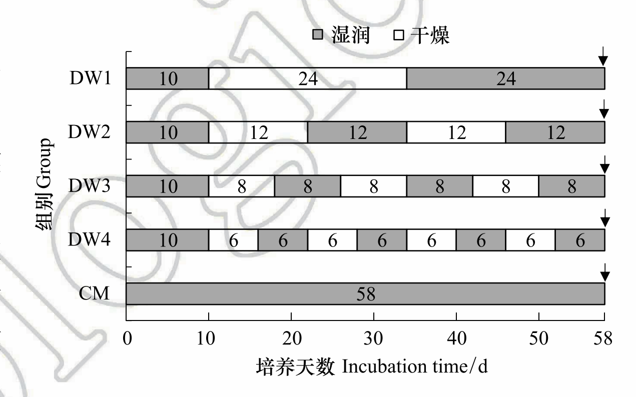


图 1 干湿交替频率设置与取样时间

Fig.1 Frequency of drying and rewetting and sampling time

组别中 DW1、DW2、DW3、DW4 是 1、2、3、4 次干湿交替组(1,2,3,4 drying-rewetting cycles)的简称,CM 是恒湿组(constantly moist)的简称

试验期干湿交替组干燥处理过程与湿润处理过程采取相同天数,一次干燥后再湿润的过程视为一次干湿交替,恒湿组的土壤则一直处于恒湿状态。干燥处理如下:于磨砂广口瓶内悬挂小包干燥剂(经 105℃过夜干燥后的硅胶,可重复利用)[18]并每天更换一次使土壤含水量降低,每天称重来记录土壤含水量(用这种方法,土壤会在 3 天内达到风干状态,并且土壤含水量不会再进一步下降)。湿润处理如下:用滴管向土壤中滴加蒸馏水,用称重法使其重量含水量达到土壤饱和含水量的 68%,每天适当滴加蒸馏水维持其土壤含水量恒定(且各组统一)[23]。

取样时间为箭头所指时间。阴影部分表示湿润处理时间,空白部分表示干燥处理时间,前 10 天阴影部分表示 10d 的培育期,后 48 天设置 0、1、2、3、4 次干湿交替,0 次干湿交替为恒湿组(CM,constantly moist)。一次干湿交替中干燥时长与湿润时长相同,1 次干湿交替(DW1,1 drying-rewetting cycle),干湿交替周期 48d,其中干燥 24d,湿润 24d;DW2 组(2 drying-rewetting cycles)干湿交替周期 24d,其中干燥 12 d,湿润 12 d;DW3 组(3 drying-rewetting cycles)干湿交替周期 16d,其中干燥 8d,湿润 8d;DW4 组(4 drying-rewetting cycles)干湿交替周期 12d,其中干燥 6d,湿润 6d。

1.3 测定指标、方法与数据分析方法

速效钾用乙酸铵提取法-火焰光度计进行测量[24-25],速效磷用 $NaHCO_3$ 提取法-Smartchem 全自动化学分析

仪进行测量[5,26],铵态氮采用 KCl 溶液浸提-Smartchem 全自动化学分析仪测量[27-28],硝态氮采用 KCl 溶液浸提-Smartchem 全自动化学分析仪测量[27],水溶性有机碳取 1:5 水土比溶液震荡后过滤清液,过 0.45μm 膜,酸化后用 Liqui TOC-Analyzer 总有机碳分析仪测定[8],土壤 pH 用 pH 计测量 1∶5 水土比溶液过滤后的清液[8,25,29]。

采用 SPSS 18.0(Chicago,USA)软件,单因素方差分析(one-way ANOVA)检验了不同干湿交替频率对土壤 pH、速效钾、速效磷、铵态氮、硝态氮、水溶性有机碳、水溶性 K^+、水溶性 Na^+ 的影响,并用 LSD 法进行两两比较。

2　结果

2.1　试验前后速效养分、DOC 的变化

土壤试验前后速效养分、DOC 的变化见表 2,结果表明:与试验前相比较,在干湿交替处理下,土壤中速效钾含量平均降低了 10.35%(P=0.004),DW1、DW2、DW3、DW4 组分别降低了 12.21%、11.53%、11.53%、6.11%;硝态氮含量平均提高了 400.73%(P<0.001),DW1、DW2、DW3、DW4 组分别提高了 356.40%、408.22%、392.03%、446.25%;土壤铵态氮含量平均降低了 73.68%(P<0.001),DW1、DW2、DW3、DW4 组分别降低了 72.45%、80.57%、71.89%、69.81%;土壤中 DOC 含量平均降低了 38.39%(P<0.001),DW1、DW2、DW3、DW4 组分别降低了 39.93%、34.15%、34.78%、44.70%。不同频率的干湿交替组对速效磷、pH 影响不显著(P>0.05),与试验前无显著差异,速效磷平均只降低 32.68%,DW1、DW2、DW3、DW4 组分别降低了 1.90%、43.33%、50.57%、34.90%,pH 平均只增加了 1.91%,DW1、DW2、DW3、DW4 组分别提高了 2.42%、1.09%、3.56%、0.57%,见表 2。

表 2　土壤试验前后速效养分的变化(均值±标准误)

Table 2　Soil available nutrient change between before and after drying-rewetting treatment (average value± standard error)

组别 Group	铵态氮/(mg/kg) Ammonium nitrogen	速效磷/(mg/kg) Available P	pH
DW1	4.87±0.83a	292.17±20.40a	7.20±0.09a
DW2	3.43±1.41a	168.77±22.71bc	7.11±0.05a
DW3	4.97±1.37a	147.21±54.80b	7.28±0.23a
DW4	5.33±1.77a	193.89±14.08abc	7.07±0.15a
DW 组均值 Average of drying-rewetting cycles	4.65±0.63a	200.51±21.62abc	7.16±0.06a
CM	6.43±2.06a	206.01±58.29abc	6.90±0.11a
试验前 Before drying-rewetting treatment	17.67±1.50b	297.83±19.02ac	7.03±0.02a

DW 组均值指 DW1、DW2、DW3、DW4 四组数据求算术平均值;同列不同字母表示在 0.05 水平上的差异显著性,相同字母表示在 0.05 水平上组间差异不显著;组别中 DW1、DW2、DW3、DW4 是 1、2、3、4 次干湿交替组(1,2,3,4 drying-rewetting cycles)的简称,CM 是恒湿组(constantly moist)的简称

2.2　不同干湿交替频率对速效养分的影响

对干湿交替组与恒湿组速效养分进行两两比较结果(图 2),结果表明:DW1、DW2、DW3 组的土壤速效钾含量显著低于 CM 组,但 DW4 组与 CM 组没有显著差异,对比 CM 组,DW 组平均降低了 9.73%(P=0.005),不同频率的各组对比中,DW1、DW2、DW3、DW4 组无显著差异,DW4 均值略大于 DW1、DW2、DW3 组(图 2a),DW4 组比 DW1 组高 6.96%;对比 CM 组,各 DW 组硝态氮含量显著低于 CM 组,DW 组平均降低了 20.83%(P<0.000),DW2、DW3 两组之间不存在显著差异,DW4 组与 DW1 组存在显著差异(图 2b),DW4 组比 DW1 组高 19.69%(P=0.016);土壤铵态氮含量在不同频率的干湿交替组之间没有显著差异(表 2),对比 CM 组,DW 组平均降低了 27.72%,最高值为 DW4 组,最低为 DW2 组,DW4 组比 DW2 组高 55.34%。由对比结果可知,随着干湿交替频率的增加,干湿交替组速效钾及硝态氮含量与恒湿组趋于同一水平。

虚线代表各指标的试验前的水平。不同字母表示在 0.05 水平上的差异显著性,相同字母表示在 0.05 水

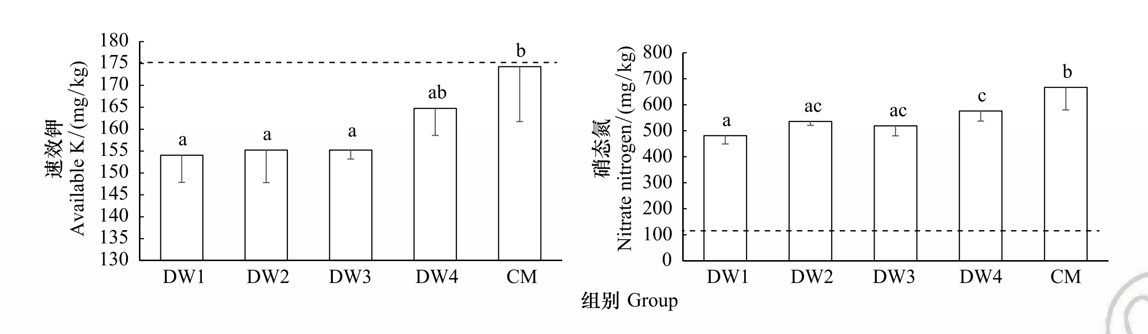


图 2 干湿交替与恒湿组速效养分两两比较结果

Fig.2 Available nutrients in constantly moist and drying-rewetting treatment soils

平上组间差异不显著。组别中 DW1、DW2、DW3、DW4 是 1、2、3、4 次干湿交替组(1,2,3,4 drying-rewetting cycles)的简称,CM 是恒湿组(constantly moist)的简称。

2.3 不同干湿交替频率对 DOC 的影响

对干湿交替组及恒湿组 DOC 含量进行两两比较,结果如下:各 DW 组的 DOC 含量显著低于 CM 组,DW 组平均低于 CM 组 22.89%(P<0.000),不同频率干湿交替组对比中,DW4 组 DOC 含量显著低于 DW2、DW3 组(图 3),对比 DW2、DW3 组,DW4 组分别降低了 16.02%、15.20%(P<0.05)。土壤经历恒湿状态会降低 DOC 含量,较试验前降低了 20.01%,土壤经历干湿交替状态 DOC 降低的程度比较大,相较恒湿状态,干湿交替能显著降低土壤中 DOC 含量。

图 3 干湿交替与恒湿组 DOC 含量两两比较结果

Fig.3 DOC in constantly moist and drying-rewetting treatment soils

虚线代表各指标的试验前的水平。不同字母表示在 0.05 水平上的差异显著性,相同字母表示在 0.05 水平上组间差异不显著

3 讨论

3.1 试验前后速效养分、DOC 的影响

本试验中干湿交替能显著降低土壤中速效钾含量,速效钾的含量在干湿交替后降低是因为溶液中的钾离子或吸附在土壤颗粒上的交换性钾离子进入 2:1 型黏土矿物的晶层之间,被镶嵌在六角形网眼中,转化成非交换性钾,从而降低钾的有效性[25,30]。

干湿交替刺激土壤提升其硝化势[11,19],使硝态氮提高[27],铵态氮降低[1,6,11,19,31-32],这在本试验中得到了验证,与土壤中的氮转化过程有关,氮转化过程包括硝化作用、生物固氮作用、反硝化作用和氨化作用[33-35]。试验过程中,每 24h 会进行通气一次,氧气供应良好,适于硝化作用的发生,通气培养有利于硝化细菌活动,土壤中存在的铵态氮和有机氮矿化产生的铵态氮,都会很快经硝化作用形成硝态氮[36-37]。另外,恒湿组 CM 硝态氮含量最高是因为湿润状态维持 68% 的土壤饱和含水率,并未大量堵塞土壤中孔隙,在通气良好的情况下,长期积累硝态氮的结果。

任文畅在综述干湿交替对土壤磷素迁移转化影响中提出干湿交替对磷素转化为难利用的磷的效果在不同的研究者的相关研究中出现不同结果,仍存在争议[38],曹琳研究三峡库区消落带干湿交替与磷转化机理研究中发现干湿交替对不同形态磷有不同的作用效果:有利于土壤释放较稳定的闭蓄态磷和钙结合态磷,同时有利于累积活性高的有机磷和活性磷[39]。故干湿交替对比连续水淹,土壤释放磷的量是增多还是减少,目前还存在争议。本试验中干湿交替对速效磷的影响并不显著,相较于曹琳的试验中较长时间(1a)的干湿季节[40],本试验的干湿交替总时长(48d)较短,故变化规律体现不出来。

土壤水溶性有机碳是土壤中易氧化的碳源[9],可作为土壤有机碳矿化作用的指示指标[11]和衡量 CO_2 释

放量的重要指标[10]。干湿交替显著减少土壤中水溶性有机碳含量[8,11,13-17],土壤呼吸量与土壤有机碳含量之间存在负相关关系[17],干湿交替可能提高了土壤呼吸总量,土壤水溶性有机碳含量因而降低。Fierer 等[41]研究两种草地在干湿交替试验中释放的 CO_2 量大约是用 K_2SO_4 溶液提取的有机碳的 10—20 倍,与本文研究结果一致:本试验中干湿交替释放的 CO_2 量大约是水溶性有机碳的 80 倍(数据未显示)。土壤中原有的或分解得到的水溶性有机碳会源源不断的供应给土壤呼吸作用,干湿交替会降低土壤中水溶性有机碳。与此同时,很多学者持有不同观点,认为干湿交替以及频繁的干湿交替会增加土壤中的水溶性有机碳,大体因为土壤结构膨胀、团聚体破坏、微生物在干旱时期的死亡、水分对微生物活性的影响等[10,19]过程导致水溶性有机碳增加。

3.2　不同干湿交替频率对速效钾、硝态氮的影响

3.2.1　速效钾

土壤经过 1 次、2 次和 3 次干湿交替处理后,速效钾的含量显著低于恒湿组[5],随着干湿交替频率增加,当达到 4 次时(周期小于等于 12d 时),干湿交替 DW4 组土壤速效钾与恒湿组 CM 已不存在显著差异(图 2a)。

在本研究中,低次数的干湿交替使土壤速效钾含量降低(DW1、DW2、DW3)是由于干湿交替的土壤会发生明显的固钾作用[4,25];而丛日环等[42]研究指出如果土壤速效钾水平不高,则不仅不会固定,频繁的干湿交替还可能使土壤发生释钾现象,频率高的 DW4 组中前几次的干湿交替使得土壤速效钾水平不高,但随着干湿交替次数趋于频繁,土壤可能出现的释钾现象,导致土壤速效钾升高。由此可推测,在多次的干湿交替过程中,对土壤速效钾的影响存在两个阶段:第一阶段是前几次干湿交替使得土壤速效钾的降低;第二阶段是随着干湿交替次数的增加,土壤开始出现释钾现象,速效钾含量开始回升。事实上,针对本研究,固定时间内(48d),干湿交替频率越高,进行越多次数的干湿交替,土壤速效钾含量越可能回升,随着干湿交替频率增加达到 4 次,土壤速效钾含量与恒湿组速效钾含量已经无显著差异,4 次干湿交替频率是出现速效钾回升的临界次数。

3.2.2　硝态氮

随着本试验中干湿交替频率增加,硝态氮含量增加可从有机氮与无机氮转化的方面来进行分析。Miller 等[32]的研究指出低频率的干湿交替的净氮矿化量较高频率的干湿交替低,低频率的干湿交替循环更容易促进氮固定,高频率的干湿交替循环更容易促进氮矿化。

干湿交替对土壤氮素矿化的影响还可从培养时间方面来分析,对半干旱生态系统中的土壤研究发现,在干土再湿润最初的一段时间内对土壤氮素矿化的刺激程度要高于土壤氮素的固定,并引起土壤无机氮的短期波动,经过一段时间,氮素的矿化和固定速率均降低,将达到一个平衡[6,43]。干湿交替频率越高,周期越短,在相同时长之下,干土再湿润次数越多,硝态氮含量就会明显高于次数较少达到氮素的矿化和固定速率平衡的干湿交替组。在本研究中,氮固定过程与氮矿化过程之间也存在某种平衡,当干湿交替达到某一频率(4 次,周期小于 12d),就可能会改变它们之间的平衡状态,频率继续增加会使得氮矿化过程比重增加,硝态氮含量增加,DW1、DW2 与 DW3 组干湿交替频率相对较低,氮素的矿化和固定速率能够在周期内回到平衡状态,因此硝态氮含量显著低于 DW4 组。

综上,由本研究结果,干湿交替频率与速效钾、硝态氮之间的关系为:不同的干湿交替频率对土壤速效钾、硝态氮含量影响程度不同,频率增加到 4 次干湿交替后,土壤速效钾含量与恒湿组已无显著差异,而硝态氮也出现明显的上升趋势。总结干湿交替对速效钾、硝态氮的影响可知,土壤速效养分的含量变化是一个复杂的平衡系统,当受到干湿交替刺激的时,该平衡会向着土壤养分增加或减少改变。实际上,以数学微积分的概念来看,在固定时间段内,干湿交替频率的增加,干燥天数更分散地插入其中,干燥与湿润状态持续时间变短,平衡改变越频繁,使得干湿交替组土壤养分含量与恒湿组趋于同一水平。以往研究速效养分与干湿交替的影响并未集中在干湿交替频率上,多数研究只采取一次干湿交替或两种不同频率的干湿交替,而不同研究者的试

验之间,变量太多,故控制其他因素、针对不同干湿交替频率对速效养分的试验就显得很必要,本文针对此进行了试验,详细探究了不同干湿交替频率下速效钾和硝态氮的含量变化。

3.3 不同干湿交替频率对 DOC 的影响

DOC 含量中,各 DW 组显著低于 CM 组($P<0.05$)(图 3),即对比恒湿组,干湿交替处理相对降低了土壤可溶性有机碳含量。微生物由干燥阶段进入湿润阶段会刺激微生物活性,释放 CO_2[44],主要经历 3 个阶段:突然复水导致微生物迅速代谢掉大量细胞溶质或产生渗透调节物质来降低自身溶质的浓度[19,45],来平衡突然改变的细胞内外水势[46-47];复水后,在水分条件好的情况下微生物进行频繁的生长繁殖活动,平衡水势与生长繁殖过程中频繁的微生物活动会极大地消耗土壤中 DOC 这类小分子有机碳水化合物;随着持续湿润和底物消耗,微生物活动减弱直至一个平缓状态。本研究中干湿交替处理下 DOC 含量低于恒湿组有可能是干湿交替作用下土壤 DOC 的消耗量大于土壤 DOC 的供应量所致,在张雪雯等[8]、王苑等[15]设计的多次干湿交替实验中,每一次干湿交替后土壤 DOC 总低于恒湿组,很好地解释了这一结果。目前土壤 DOC 的相关研究中提及的供应来源有:土壤团聚体破碎[10,15,31]、崩解作用[46]、微生物在干旱阶段死亡而暴露到土壤中有机质[10,48]等,但大多只是推测,缺乏在单一因素影响下针对 DOC 消耗量与供应量的量化研究,这也是本研究和今后研究中的难点。

4 结论

(1)经过干湿交替,土壤中速效钾、铵态氮、DOC 的含量下降,硝态氮含量增加,速效磷、pH 的变化不明显。土壤中速效钾、硝态氮、DOC 含量恒湿组比干湿交替组高。

(2)在固定时间内(48d),随着干湿交替的频率增加(从 1 次到 2、3、4 次),周期变短(从 48d 到 24、16、12d),干燥与湿润的持续时间变短(从 24d 到 12、8、6d),干湿交替组的速效钾、硝态氮含量分别趋于恒湿组的速效钾、硝态氮水平。低频率的干湿交替使得土壤速效钾含量减少,高频率可能在后期出现释钾现象,4 次干湿交替频率是出现速效钾回升的临界次数,速效钾含量随着干湿交替频率增加可能会有所增加,趋近恒湿组速效钾水平。干湿交替频率增加更频繁的打破平衡,促进矿化,随着干湿交替频率增加,硝态氮含量增加,趋近恒湿组硝态氮水平。

参考文献(References):

[1] 欧阳扬, 李叙勇. 干湿交替频率对不同土壤 CO_2 和 N_2O 释放的影响. 生态学报, 2013, 33(4): 1251-1259.
[2] 赵蓉, 李小军, 赵洋, 杨昊天, 陈栋. 固沙植被区两类结皮斑块土壤呼吸对不同频率干湿交替的响应. 生态学杂志, 2015, 34(1): 138-144.
[3] de Oliveira T S, de Costa L M, Schaefer C E. Water-dispersible clay after wetting and drying cycles in four Brazilian oxisols. Soil and Tillage Research, 2005, 83(2): 260-269.
[4] 朱咏莉, 刘军, 王益权, 贾宏涛, 孙慧敏, 邱莉萍. 干湿交替过程对黄土高原几种主要土壤钾有效性的影响. 土壤通报, 2002, 33(6): 435-437.
[5] 魏琳琳, 徐刚, 孙军娜, 谢文军, 邵宏波. 干湿交替变化对土壤中磷形态影响及环境意义. 环境保护前沿, 2012, 2(2): 15-19.
[6] 张威, 张旭东, 何红波, 解宏图, 白震. 干湿交替条件下土壤氮素转化及其影响研究进展. 生态学杂志, 2010, 29(4): 783-789.
[7] Birch H F. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. Plant and Soil, 1958, 10(1): 9-31.
[8] 张雪雯, 莫熠, 张博雅, 高居娟, 高俊琴. 干湿交替及凋落物对若尔盖泥炭土可溶性有机碳的影响. 湿地科学, 2014, 12(2): 134-140.
[9] 贺云龙, 齐玉春, 董云社, 彭琴, 孙良杰, 贾军强, 郭树芳, 闫钟清. 干湿交替下草地生态系统土壤呼吸变化的微生物响应机制研究进展. 应用生态学报, 2014, 25(11): 3373-3380.
[10] 王君, 宋新山, 严登华, 陈燕. 多重干湿交替格局下土壤 Birch 效应的响应机制. 中国农学通报, 2013, 29(27): 120-125.
[11] Fierer N, Schimel J P. Effects of drying——rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(6): 777-787.
[12] Intergovernmental Panel on Climate Change. 气候变化 2014 综合报告决策者摘要. [2016-06-17]. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM_zh.pdf.
[13] Zsolnay A, Görlitz H. Water extractable organic matter in arable soils: effects of drought and long-term fertilization. Soil Biology and Biochemistry, 1994, 26(9): 1257-1261.

[14] Christ M J, David M B. Dynamics of extractable organic carbon in Spodosol forest floors. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28(9): 1171-1179.
[15] 王苑, 宋新山, 王君, 严登华, 王宇晖, 周斌. 干湿交替对土壤碳库和有机碳矿化的影响. 土壤学报, 2014, 51(2): 342-350.
[16] Wang F L, Bettany J R. Influence of freeze-thaw and flooding on the loss of soluble organic carbon and carbon dioxide from soil. Journal of Environmental Quality, 1993, 22(4): 709-714.
[17] 孟伟庆, 莫训强, 胡蓓蓓, 贺梦璇, 李洪远. 模拟干湿交替对湿地土壤呼吸及有机碳含量的影响. 土壤通报, 2015, 46(4): 910-915.
[18] 王君, 宋新山, 王苑. 多重干湿交替对土壤有机碳矿化的影响. 环境科学与技术, 2013, 36(11): 31-35.
[19] 陈林, 张佳宝, 赵炳梓, 黄平. 不同施氮水平下土壤的生化性质对干湿交替的响应. 土壤学报, 2013, 50(4): 675-683.
[20] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996: 1-9.
[21] Shi A D, Marschner P. The number of moist days determines respiration in drying and rewetting cycles. Biology and Fertility of Soils, 2015, 51(1): 33-41.
[22] Shi A D, Marschner P. Drying and rewetting frequency influences cumulative respiration and its distribution over time in two soils with contrasting management. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 72: 172-179.
[23] 黄石德, 潘辉, 叶功富, 黄传春, 赵凯. 模拟干湿交替对林内和林窗表土碳释放的影响. 江西农业大学学报, 2010, 32(6): 1175-1179.
[24] 丛日环, 李小坤, 鲁剑巍, 周六凤, 姜存仓, 廖志文. 不同水分状况对红壤和黄褐土速效钾含量的影响. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 1072-1077.
[25] 徐姗姗. 水分管理方式及土壤酸化对寒地稻田土壤钾的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.
[26] 林君锉, 涂文子, 梁永津, 赵彦龙. Smartchem 200 全自动间断化学分析仪测定地表水中磷酸盐含量. 理化检验-化学分册, 2014, 50(1): 130-131.
[27] 李源, 祝惠, 阎百兴, 袁星. 干湿交替对黑土氮素转化及酶活性的影响研究. 干旱区资源与环境, 2015, 29(10): 140-144.
[28] 涂文子, 林君锉, 刘胜玉, 赵彦龙. Smartchem200 全自动间断化学分析仪测定珠江八大口门水中的氨氮. 分析仪器, 2013, (3): 26-28.
[29] 王明, 张晴雯, 杨正礼, 张爱平, 谢晓军, 惠锦卓. 宁夏引黄灌区干湿交替过程中土壤 pH 的动态变化及影响因素. 核农学报, 2014, 28(4): 720-726.
[30] Khaled E M, Stucki J W. Iron oxidation state effects on cation fixation in smectites. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55(2): 550-554.
[31] Pulleman M, Tietema A. Microbial C and N transformations during drying and rewetting of coniferous forest floor material. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31(2): 275-285.
[32] Miller A E, Schimel J P, Meixner T, Sickman J O, Melack J M. Episodic rewetting enhances carbon and nitrogen release from chaparral soils. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(12): 2195-2204.
[33] Müller C, Rütting T, Kattge J, Laughlin R J, Stevens R J. Estimation of parameters in complex ^{15}N tracing models by Monte Carlo sampling. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(3): 715-726.
[34] 罗亲普, 龚吉蕊, 徐沙, 宝音陶格涛, 王忆慧, 翟占伟, 潘琰, 刘敏, 杨丽丽. 氮磷添加对内蒙古温带典型草原净氮矿化的影响. 植物生态学报, 2016, 40(5): 480-492.
[35] Holst J, Liu C Y, Brüggemann N, Butterbach-Bahl K, Zheng X H, Wang Y S, Han S H, Yao Z S, Yue J, Han X G. Microbial N turnover and N-oxide ($N_2O/NO/NO_2$) fluxes in semi-arid grassland of Inner Mongolia. Ecosystems, 2007, 10(4): 623-634.
[36] 刘宝东. 实验室培养条件下森林暗棕壤的氮矿化特征[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2006.
[37] 李世清, 李生秀, 李凤民. 石灰性土壤剖面氮素的矿化和硝化作用. 兰州大学学报: 自然科学版, 2000, 36(1): 98-104.
[38] 任文畅, 王沛芳, 钱进, 任凌霄. 干湿交替对土壤磷素迁移转化影响的研究综述. 长江科学院院报, 2015, 32(5): 41-47.
[39] 曹琳. 三峡库区消落带水——沉积物界面磷干湿交替分布特征及转化机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
[40] 曹琳, 吉芳英. 三峡库区消落带干湿交替表层沉积物磷分布特征. 地球与环境, 2013, 41(2): 126-131.
[41] Fierer N, Schimel J P. A proposed mechanism for the pulse in carbon dioxide production commonly observed following the rapid rewetting of a dry soil. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(3): 798-805.
[42] 丛日环, 李小坤, 鲁剑巍. 土壤钾素转化的影响因素及其研究进展. 华中农业大学学报, 2007, 26(6): 907-913.
[43] Saetre P, Stark J M. Microbial dynamics and carbon and nitrogen cycling following re-wetting of soils beneath two semi-arid plant species. Oecologia, 2005, 142(2): 247-260.
[44] 杨玉盛, 陈光水, 董彬, 王小国, 谢锦升, 李灵, 卢豪. 格氏栲天然林和人工林土壤呼吸对干湿交替的响应. 生态学报, 2004, 24(5): 953-958.
[45] Halverson L J, Jones T M, Firestone M K. Release of intracellular solutes by four soil bacteria exposed to dilution stress. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5): 1630-1637.
[46] 王健波, 张燕卿, 严昌荣, 刘恩科. 干湿交替条件下土壤有机碳转化及影响机制研究进展. 土壤通报, 2013, 44(4): 998-1004.
[47] Schimel J, Balser T C, Wallenstein M. Microbial stress-response physiology and its implications for ecosystem function. Ecology, 2007, 88(6): 1386-1394.
[48] Wu J, Brookes P C. The proportional mineralisation of microbial biomass and organic matter caused by air-drying and rewetting of a grassland soil. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(3): 507-515.